

## BAB 3

# PERANCANGAN INVERTER TIGA PHASA DAN PENALAAN PENGENDALI KECEPATAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai pembuatan *inverter* tiga fasa dengan komponen elektronika daya. *Inverter* adalah jenis konverter yang berfungsi mengubah tegangan atau arus DC menjadi AC. Komponen penyusun *inverter* yang dibahas mulai dari jenis-jenis saklar elektronik (transistor) yang dapat digunakan. Diode antiparalel (yang dipasang paralel terbalik dengan transistor daya) diterangkan dengan bentuk gelombang hasil simulasinya dan mengapa diperlukan untuk beban induktif. Kemudian dijelaskan mengenai rangkaian *drive* yang berfungsi menjembatani antara keluaran rangkaian kontrol dengan spesifikasi input transistor daya dan snubber yang berfungsi melindungi transistor daya. Selanjutnya dibahas mengenai penalaan pengendali kecepatan yang berfungsi untuk mencari nilai  $K_p$ ,  $K_i$  untuk mencari nilai frekuensi acuan motor.

### 3.1 Semikonduktor Untuk Inverter

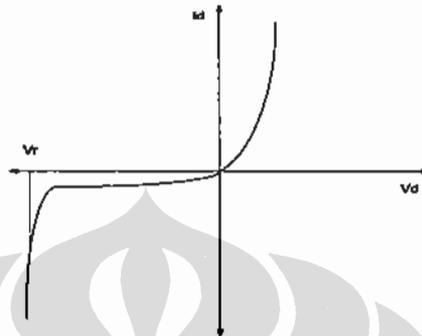
Sifat dari rangkaian elektronika daya tidak banyak dipengaruhi oleh *device* sebenarnya yang digunakan, khususnya jika *drop* tegangan pada *switch* yang menghantar rendah jika dibandingkan tegangan lain pada rangkaian. Oleh karena itu *device* semikonduktor dapat dimodelkan sebagai saklar (*switch*) ideal untuk melihat sifat rangkaian. Saklar dimodelkan menutup (*short circuit*) ketika *on* dan membuka (*open circuit*) ketika *off*. Transisi antara kedua keadaan itu diasumsikan terjadi seketika.

#### 3.1.1 Dioda

Dioda adalah *switch* semikonduktor yang paling sederhana. Dioda tidak terkontrol artinya dalam hal *on* atau *off* ditentukan oleh tegangan dan arus rangkaian. Dioda menyala (*forward biased*) ketika arus  $i_d$  positif dan mati (*reverse biased*) ketika tegangan  $v_d$  negatif (gambar 3.1). Dioda ideal, *short circuit* ketika menyala dan *open circuit* ketika mati. Karakteristik arus sebagai tegangan dan simbol dioda ditunjukkan pada Gambar 2.2 dan 2.1 di bawah ini.



**Gambar 3.1:** Simbol dioda.



**Gambar 3.2:** Karakteristik dioda.

Jika dioda diberi tegangan maju maka dengan tegangan yang kecil (umumnya  $\pm 0.6$  volt) akan mengalir arus maju. Kenaikan tegangan yang melebihi tegangan *knee* akan mengakibatkan arus maju yang besar.  $V_r$  adalah tegangan tembus dioda (*Peak Inverse Voltage*). Apabila dioda diberi tegangan di atas maka akan mengalir arus balik yang besar dan dioda sudah tidak mampu menahan disipasi daya yang besar.

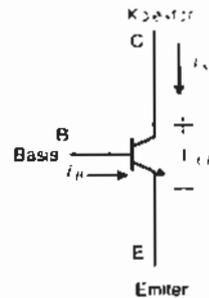
### 3.1.2 Transistor

Transistor dioperasikan sebagai *switch* pada rangkaian elektronika daya. Rangkaian penggerak (*drive*) transistor dirancang agar transistor berada dalam keadaan benar-benar *on* atau *off*. Ini tidak seperti aplikasi transistor yang lain (rangkaian penguat atau *amplifier*) dimana transistor beroperasi pada daerah linier atau daerah aktif. Transistor mempunyai sifat dapat diatur atau dikontrol kondisi nyala (*on*) dan mati (*off*). Berbeda dengan dioda yang tidak dapat dikontrol pada kondisi *on* dan *off*. Jenis transistor yang digunakan dalam rangkaian elektronika daya adalah :

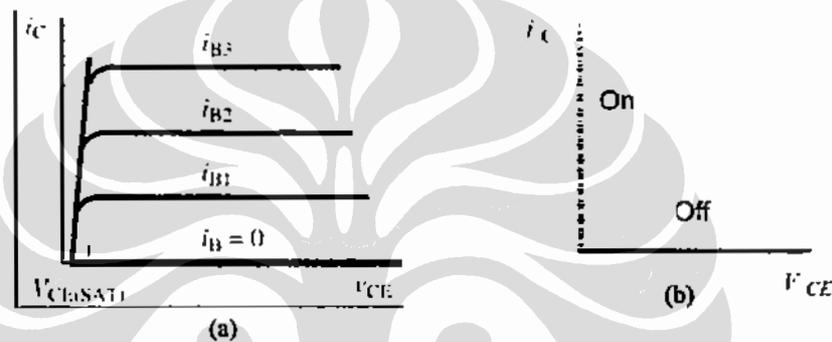
- *Bipolar Junction Transistor* (BJT)
- *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET)
- *Insulated-Gate Bipolar Junction Transistor* (IGBT)

### 3.1.3 Bipolar Junction Transistor (BJT)

Simbol BJT ditampilkan pada gambar 3.3. Karakteristik umum BJT dan karakteristik ideal ditampilkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.3: Simbol rangkaian BJT.



Gambar 3.4: Karakteristik umum BJT (a) dan karakteristik ideal BJT (b)

Pada BJT keadaan *on* dicapai dengan memberi arus basis yang cukup untuk membuat BJT menjadi jenuh atau saturasi. Tegangan jenuh kolektor-emitor ( $V_{CE\text{ sat}}$ ) BJT daya umumnya 1-2 Volt. Arus basis nol membuat transistor *off* karena BJT adalah alat yang dikontrol arus. BJT daya umumnya mempunyai  $h_{FE}$  ( $h_{FE} = I_C / I_b$ ) rendah, kadang lebih kecil dari 20. Misalkan BJT daya dengan  $h_{FE}$  20 diatur untuk melewatkan arus kolektor 60 A, maka arus basis harus 3 A untuk membuat transistor jenuh. Rangkaian *drive* untuk memberi arus basis yang cukup besar itu merupakan rangkaian daya tersendiri. Rangkaian Darlington Penguatan (*gain*) arus efektif dari rangkaian mendekati hasil kali penguatan masing-masing transistor, dan dapat mengurangi arus yang harus disediakan rangkaian kontrol untuk menggerakkan transistor daya. Rangkaian Darlington dapat dibuat dengan dua transistor diskrit atau satu *device* yang terpadu. BJT daya tersedia dengan kapasitas sampai 1200 V dan 400 A dan umumnya mempunyai kemampuan daya

dalam rating tegangan dan arus yang lebih besar dibanding MOSFET oleh karena itu cocok digunakan pada konverter yang beroperasi sampai sekitar 15 kHz.

### 3.2 Rangkaian Daya

Rangkaian daya inverter ini menggunakan rangkaian inverter tiga fasa jembatan penuh (Gambar 3.7). Komponen dayanya dipilih transistor yang mempunyai kecepatan komutasi yang tinggi dan kendali pemadamannya mudah. Inverter yang dicoba mempunyai rating daya 550 Watt pada tegangan masukan 220 Volt yang kemudian diturunkan menjadi 110 volt dengan trasformer sehingga dapat digunakan transistor tipe D2553 yang mempunyai tegangan  $V_{CE} = 600$  Volt dan arus  $I_C = 7$  Ampere . Sebagai pengaman, setiap transistor dipasang rangkaian *snubber* RC dan diode *freewheel* (FD) seperti pada Gambar 3.5. *Snubber* berguna untuk membatasi besar kecuraman tegangan  $dV/dt$ . Nilai C diperoleh dari rumus berikut ini .

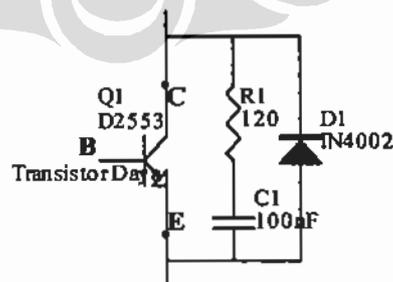
$$C = \frac{I_L T_f}{2E} \quad (3.46)$$

$$= \frac{5 \times 10^{-6}}{2.110}$$

$$= 23 \text{ nF}$$

Dengan :

- C = Kapasitansi *Snubber* (Farad)
- $I_L$  = Arus beban inverter (Ampere )
- $T_f$  = Waktu pemadaman transistor ( detik )
- E = Tegangan sumber searah (Volt)



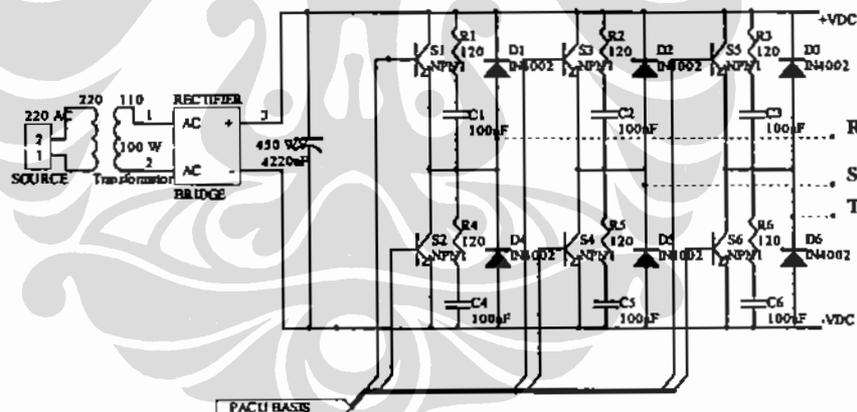
Gambar 3.5: Rangkaian pengaman transistor daya



daya berfungsi untuk menimbulkan *overshoot* pada sisi depan gelombang sehingga proses penyalaan transistor daya berlangsung cepat. Jadi sebelum sinyal pwm dari *microcontroller* diteruskan ke penguat utama dengan arus dan tegangan tinggi, sinyal tersebut terlebih dahulu dikuatkan dengan rangkaian pada Gambar 3.6. Pada rangkaian picu basis sinyal pwm dikuatkan dua kali oleh transistor T1 dan T2. Rangkaian picu basis juga dilengkapi dengan pengamanan berupa dioda zener dan isolator optik (*optoisolator*).

### 3.2.2 Rancangan Rangkaian Inverter

Inverter merupakan suatu alat yang dapat mengubah sinyal tegangan dc menjadi sinyal ac atau tegangan sinusoida dengan frekuensi dan level tegangan yang dapat diatur. Oleh karena itu maka alat ini biasa dipakai untuk menjalankan motor induksi tiga fasa dengan kecepatan yang dapat dikendalikan. Rangkaian inverter tiga fasa yang digunakan pada tesis ini terdiri dari 6 buah komponen switching seperti ditunjukkan pada gambar 3.7. Rangkaian tersebut menggunakan transistor sebagai komponen switching, selain itu dapat juga digunakan thyristor tetapi memerlukan suatu elemen komutasi.



Gambar 3.7: Rangkaian Inverter transistor BJT tiga fasa

Pada rangkaian inverter tiga fasa seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.7 transistor yang digunakan adalah jenis BJT yang memiliki waktu *turn-on* dan *turn-off* sekitar  $0.3\mu s$  sehingga cocok untuk diaplikasikan pada inverter frekuensi tinggi.

- ⇒ Pengaturan sinyal pwm pada basis 1 akan menghasilkan pulsa-pulsa untuk fasa R positif dan pada basis 2 akan menghasilkan pulsa-pulsa untuk fasa R negatif.
- ⇒ Pengaturan sinyal pwm pada basis 3 akan menghasilkan pulsa-pulsa untuk fasa S positif dan pada basis 4 akan menghasilkan pulsa-pulsa untuk fasa S negatif.
- ⇒ Pengaturan sinyal pwm pada basis 5 akan menghasilkan pulsa-pulsa untuk fasa T positif dan pada basis 6 akan menghasilkan pulsa-pulsa untuk fasa T negatif.

Untuk menghasilkan suatu keluaran tiga fasa pada inverter dibutuhkan suatu pengendali inverter yang akan mengatur pulsa-pulsa pada masing-masing basis transistor BJT. Dioda yang di pasang paralel dengan keluaran transistor BJT berfungsi untuk melewatkan arus balik. Tanpa pemasangan dioda tersebut, arus balik dapat merusak transistor BJT. Besarnya tegangan balik (PIV) pada dioda tersebut adalah :

$$PIV = \sqrt{2} V_{ma} \quad (3.48)$$

$$= \sqrt{2} * 110 = 155.6 \text{ Volt}$$

Jika arus balik terbesar adalah sama dengan arus yang mengalir pada beban penuh maka arus yang mengalir pada dioda adalah :

$$I_D = \frac{550 \text{ watt}}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 0.7} = 4.12 \text{ A}$$

Jika arus maksimum ( $I_{max}$ ) adalah :

$$I_{max} = \sqrt{2} \cdot I_D$$

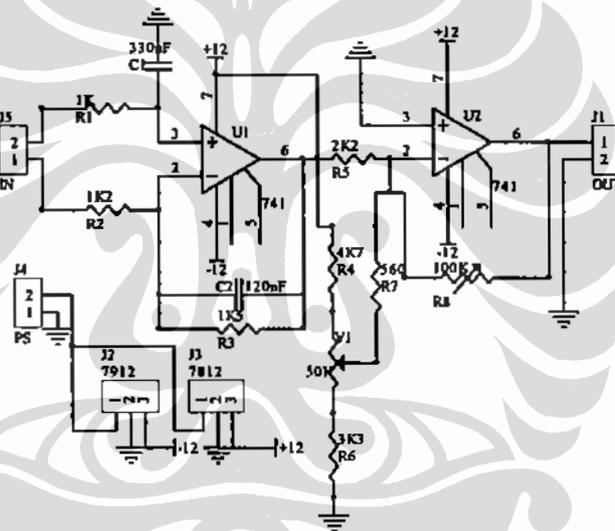
$$I_{max} = \sqrt{2} * 4.12 = 5.83 \text{ A}$$

Maka arus searah ( $I_{DC}$ ) yang mengalir pada masing-masing dioda adalah :

$$I_{DC} = \frac{I_{max}}{\pi} = \frac{5.83 \text{ A}}{3.14} = 1.86 \text{ A}$$

### 3.2.3 Rangkaian Sensor Kecepatan

Pada sistem pengaturan kecepatan motor induksi yang menggunakan pengendali selalu diimbangi dengan sinyal *feedback* agar dapat dilakukan pengendalian. Sensor kecepatan ini hanya mendeteksi tegangan yang berasal dari putaran motor dc yang di pasang pada poros rotor motor induksi, sehingga motor dc tersebut akan menjadi generator listrik untuk menampilkan tegangan sinyal analog. Sinyal analog tersebut akan dikonversi ke sinyal digital oleh ADC internal *microcontroller AVR*. Tegangan sinyal analog di setting pada kondisi 0 Vdc ketika motor induksi belum berputar. Dan juga di setting pada nilai 5 Vdc pada saat motor induksi berputar pada kecepatan maksimal. Rangkaian sensor kecepatan dirancang dengan menggunakan rangkaian *Non-Inverting Amplifier* yang menggunakan dua buah OP-Amp yang dipasang secara seri seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8 di bawah ini.

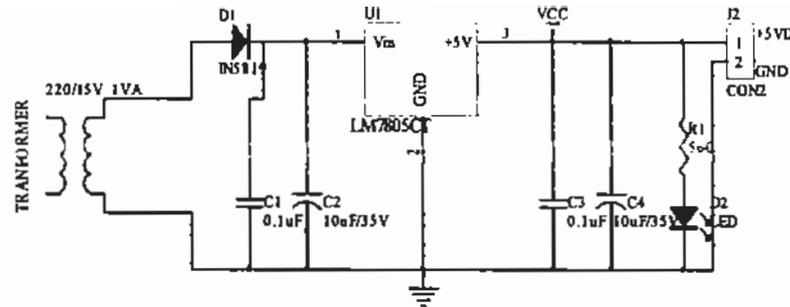


Gambar 3.8 : Rangkaian Sensor kecepatan

### 3.3 SISTEM MINIMAL AVR TIPE ATMEGA16

Pengendali yang dirancang adalah menggunakan pengontrol mikro dan bekerja dalam ragam *Single Chip Operation* (mode operasi keping tunggal) yang tidak memerlukan memori luar karena ROM untuk menyimpan data dalam bentuk *hex* masih mampu untuk menampung program PWM yang akan dibuat serta penggunaan RAM yang masih bisa ditampung oleh *internal RAM* dan tidak memerlukan komponen tambahan seperti PPI, karena penggunaan *port* pengontrol

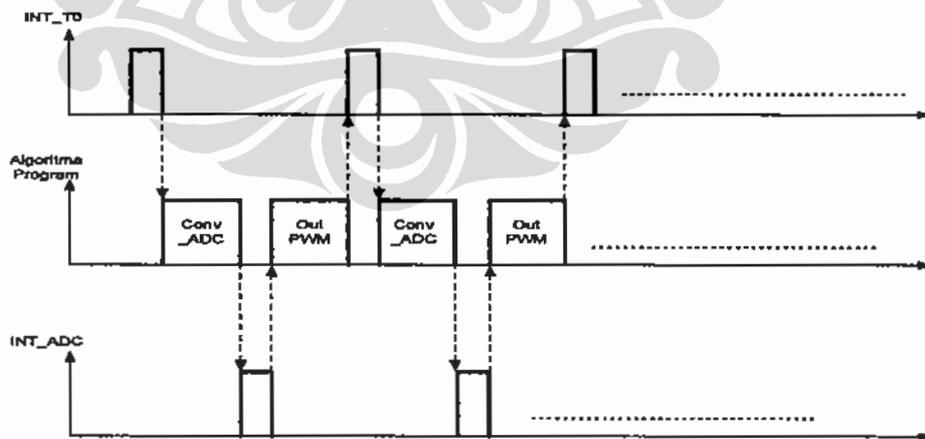




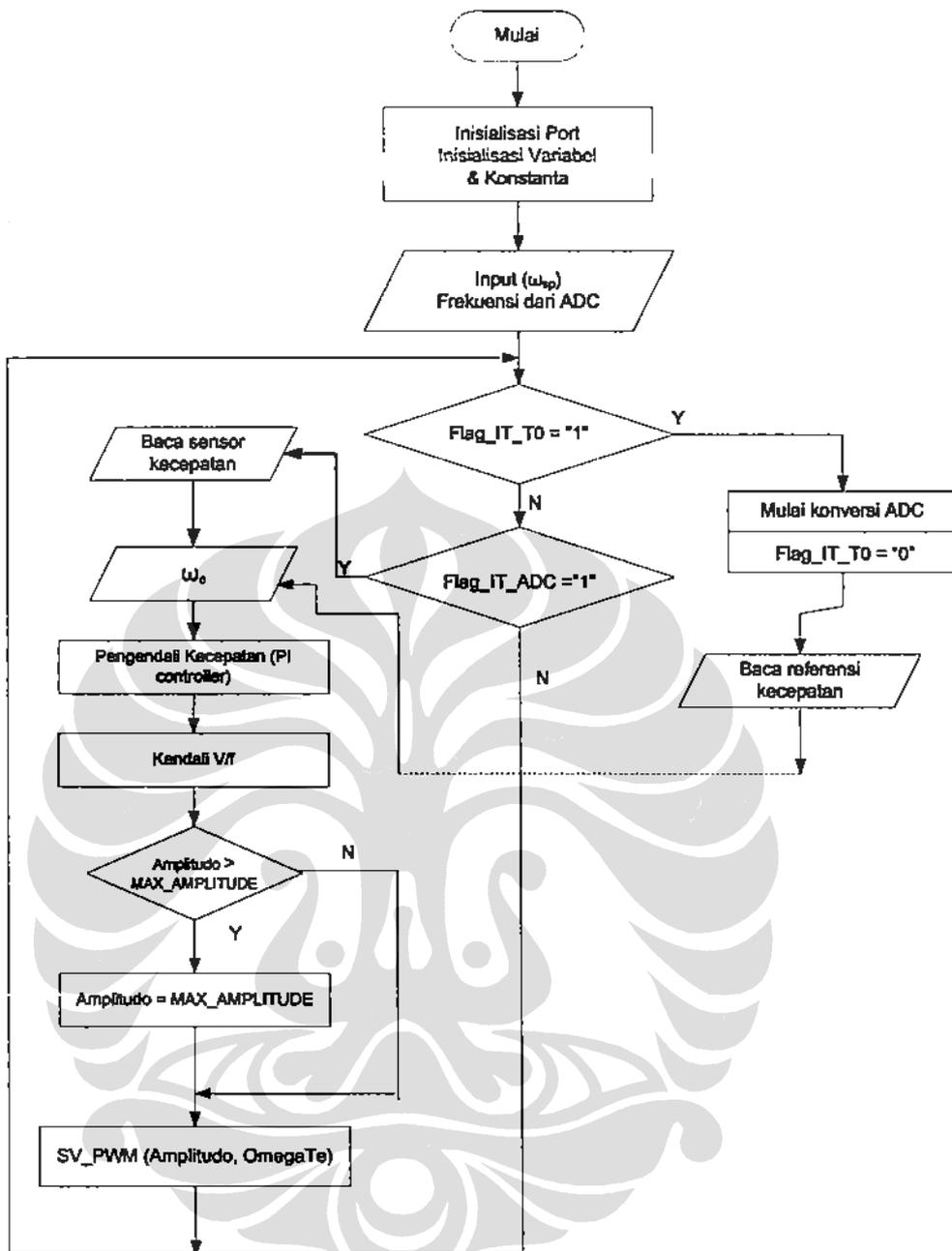
Gambar 3.10 : Rangkaian Catu daya Sinyal PWM

### 3.4 Perancangan Program Pengontrol Mikro ATmega16

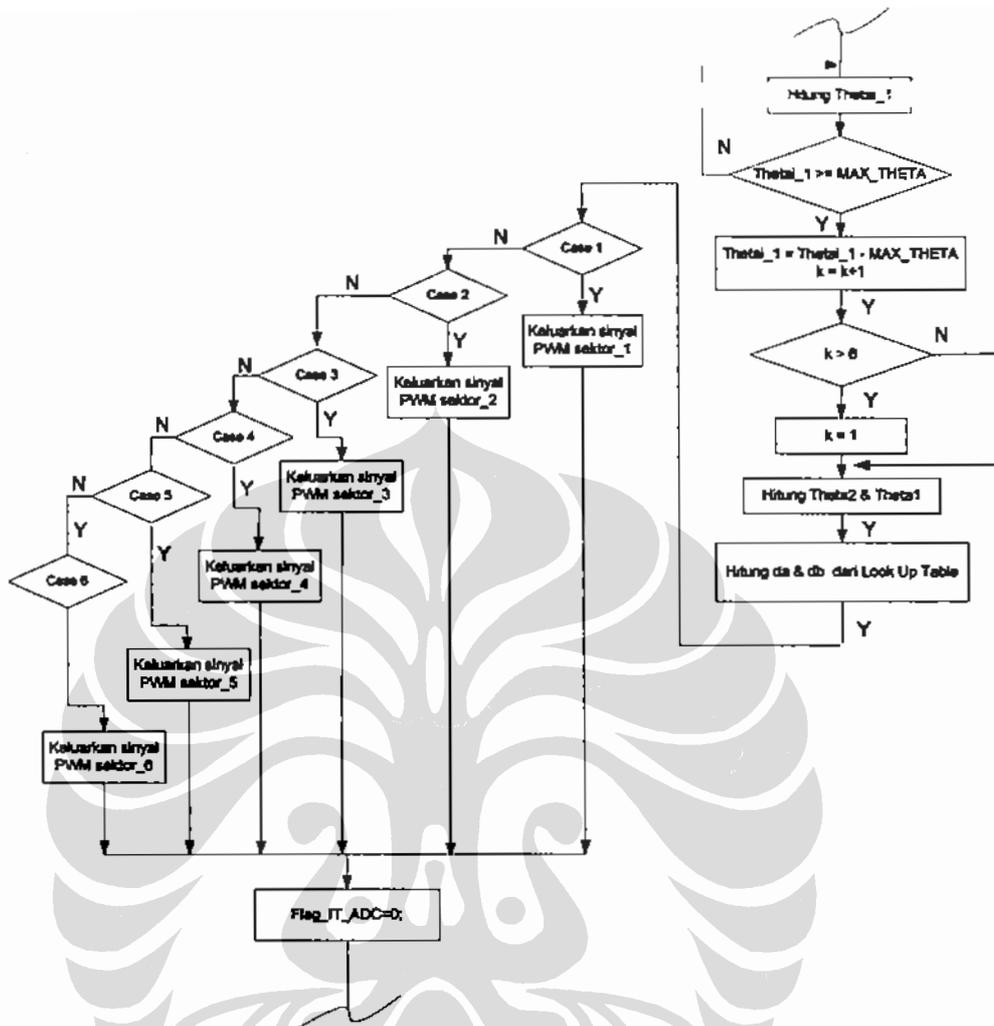
Program yang digunakan dalam *microcontroller* ATmega16 menggunakan pemrograman bahasa C yang kemudian di-*compile* dan dimasukkan ke dalam chip IC Atmega16 dalam bentuk kode *hexadecimal* untuk mengontrol kerja pada sistem. INT\_T0 digunakan untuk menginterupsi saat proses mulai konversi ADC sampai dengan selesai proses algoritma program. Jika timer 0 over flow, maka set flag T0 sama dengan satu kemudian dilanjutkan proses start ADC. Setelah selesai konversi ADC, maka set flag ADC sama dengan satu kemudian dilanjutkan proses algoritma program *Space Vector* pwm. Setelah selesai proses algoritma program *Space Vector* pwm, maka timer 0 over flow dan proses akan berulang seperti semula. Proses kerja interap timer 0 dan ADC dapat direpresentasikan dalam bentuk pola sinyal seperti pada gambar 3.11. Sedangkan diagram alir dari program pada *microcontroller* dapat dilihat pada gambar 3.12 dan 3.13.



Gambar 3.11 : Pola Interupt Timer0 dan ADC



Gambar 3.12 : Diagram Alir Main program



Gambar 3.13 : Diagram alir program SVPWM

Pada bagian gambar 3.2 dapat diuraikan langkah pertama merupakan program inisialisasi, yaitu menginisialisasi port-port yang akan dipakai untuk menentukan variabel dan konstanta. Variabel yang ditentukan adalah MAX\_THETA dengan nilai 80 sebagai resolusi dari setiap sektor dengan sudut  $60^{\circ}$ , jadi setiap sektor mempunyai resolusi sudut sebesar  $0.75^{\circ}$ . Pada pengontrol mikro ATmega16 pwm yang digunakan adalah 8 bit sehingga variable MAX\_PWM yang digunakan sebagai resolusi *Top count* adalah 255. Selanjutnya input yang digunakan dalam menentukan frekuensi menggunakan port ADC untuk membaca sekaligus mengkonversi data analog kedalam data digital yaitu menggunakan satu potensiometers. Untuk mengeluarkan sinyal PWM ke port

keluaran yaitu pada portD.4, portD.5, portD.7 dengan menggunakan satu fungsi :

```
void sector_pwm(unsigned int S1, unsigned int S2, unsigned int S3)
```

```
{  
  OCR1A = S1;      // pwmA  
  OCR1B = S3;      // pwmB  
  OCR2  = S5;      // pwmC  
}
```

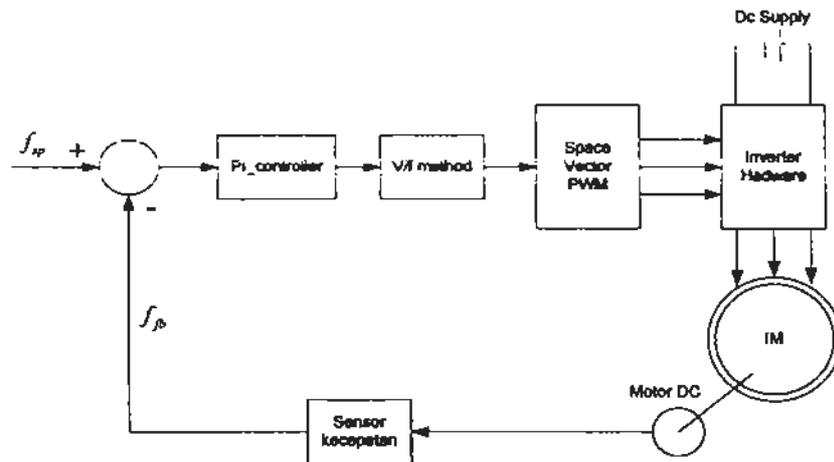
Langkah yang ke dua adalah menentukan waktu durasi  $d_a$  dan  $d_b$  dengan menggunakan persamaan yang telah didapat terlihat pada tabel 2.3. Dan langkah ke tiga yaitu menentukan waktu switching atau *duty cycle* untuk switch  $S_1$ ,  $S_3$ , dan  $S_5$  yang terdapat dalam tabel 2.2.

Perancangan yang sudah jadi dalam bentuk rangkaian elektronik seperti yang terlihat pada gambar 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 dan 3.10 di atas, kemudian diimplementasikan dalam sistem perangkat keras secara keseluruhan yang akan digunakan dalam pengujian untuk pengambilan data dapat dilihat pada gambar 3.14. di bawah ini.



*Gambar 3.14 : Sistem minimum pengontrol Kecepatan motor induksi AC tiga fasa*

Dari uraian diagram alir program, maka diagram blok dari sistem pengaturan kecepatan motor induksi dapat ditunjukkan pada gambar 3.15 di bawah ini.



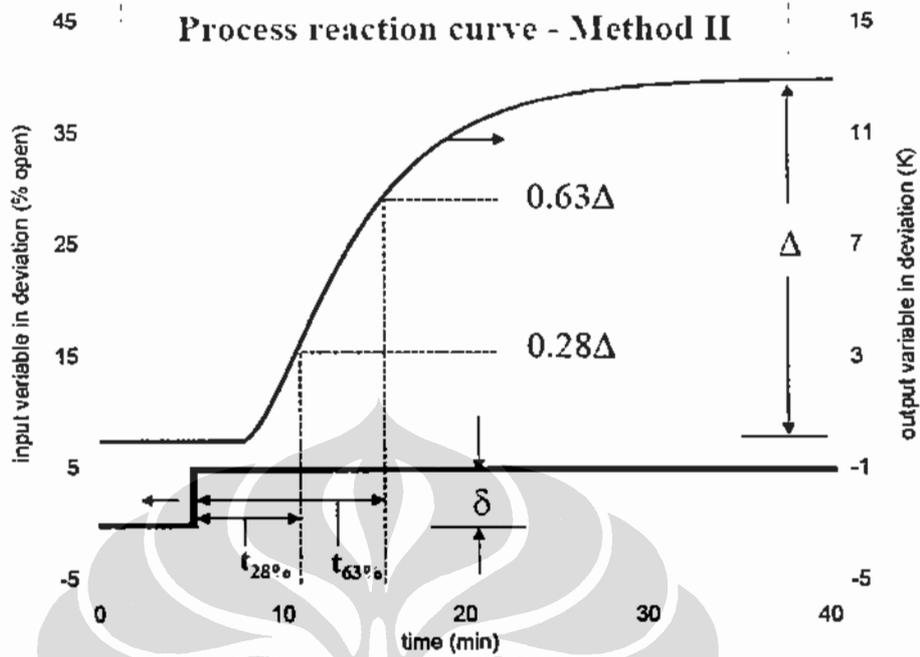
Gambar 3.15: Diagram blok sistem kontrol kecepatan motor induksi Ac tiga fasa

### 3.5 Penalaan Pengendali Kecepatan

Penalaan atau tuning adalah prosedur untuk menyetel parameter kontroler berumpan – balik untuk mendapatkan respon lup tertutup yang ditentukan. Dalam penalaan pengendali kecepatan ini menggunakan pengendali PI yang merupakan dari dua unit *control*, yaitu P dan I. Sifat pengendali P yang selalu meninggalkan *offset* dapat ditutupi oleh kelebihan I, sedangkan sifat pengendali I yang lambat dapat ditutupi oleh pengendali P, sehingga pengendalian PI diharapkan akan mampu menghasilkan *response* yang lebih cepat dari pengendalian integral sekaligus mampu menghilangkan *offset* yang ditinggalkan pengendalian P. Untuk menentukan nilai  $K_p$  dan  $K_i$  dilakukan dengan pengujian menggunakan sinyal unit step dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- Kontroler disetting manual, kemudian menganalisa perubahan step pada sinyal keluaran.
- Mencatat respon sinyal keluaran transmitter  $\Delta$ .

Sedangkan untuk acuan dalam menentukan nilai  $K_p$  dan  $K_i$  digunakan *Tuning Charts for PI Feedback Controllers* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.16 sedangkan untuk menentukan *dead time* dan *time constant* sebagai acuannya menggunakan gambar 3.17



(T. Marlyn)

Gambar 3.16 : Respon step lup terbuka

$$K_p = \Delta / \delta \quad (3.49)$$

$$\tau = 1.5(t_{63\%} - t_{28\%}) \quad (3.50)$$

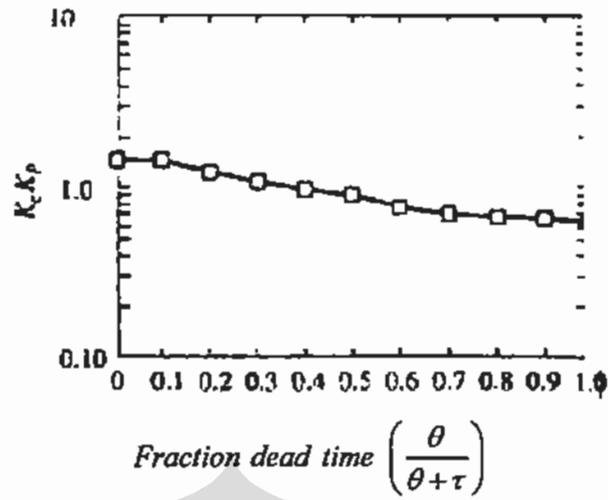
$$\theta = t_{63\%} - \tau \quad (3.51)$$

dengan

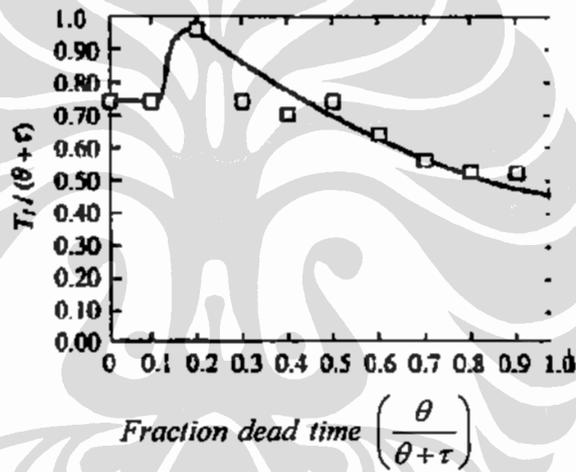
$K_p$  : Proportional gain

$\tau$  : Time constant

$\theta$  : Dead Time



Gambar 3.17: Diagram tuning PI Controller untuk mencari nilai  $K_c$



Gambar 3.18: Diagram tuning PI Controller untuk mencari nilai  $K_i$